

SUR LA DÉTERMINATION DES PERTES DES CONDENSATEURS AUX FRÉQUENCES INDUSTRIELLES

PAR

J. B. BERTHER
DE DISENTIS

THÈSE PRÉSENTÉE A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR ÈS-SCIENCES



ZÜRICH
FACHSCHRIFTENVERLAG & BUCHDRUCKEREI A.-G.
1925

Ce travail a paru dans le
Bulletin de l'Association suisse des Electriciens No. 3, 1925, pages 113 et suivantes.

SUR LA DÉTERMINATION DES PERTES DES CONDENSATEURS AUX FRÉQUENCES INDUSTRIELLES

PAR

J. B. BERTHER
DE DISENTIS



THÈSE PRÉSENTÉE A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR ÈS-SCIENCES



ZÜRICH
FACHSCHRIFTENVERLAG & BUCHDRUCKEREI
1925

A bab e mumma!



Sur la détermination des pertes des condensateurs aux fréquences industrielles.

Introduction.

W. Siemens¹⁾ est le premier qui, en 1864, démontrait que le passage de l'électricité à travers une capacité était accompagné d'une perte d'énergie qui a pour effet d'échauffer le diélectrique et d'amortir les oscillations. Après W. Siemens, ce phénomène a été étudié par différents auteurs²⁾ et plusieurs méthodes ont été développées pour le mesurer expérimentalement. Ainsi, la méthode de Bjerknes³⁾, longtemps la plus utilisée et qui sert de base à plusieurs autres méthodes, permet de déterminer la somme des décrets du circuit de mesure et du circuit oscillant. Les deux décrets peuvent être séparés en introduisant au circuit de mesure une résistance connue. L'application de la méthode de Bjerknes exige un couplément extrêmement lâche entre les deux circuits, c'est-à-dire des appareils de mesure très sensibles et ne donne qu'indirectement les pertes dans le condensateur. M. Brandes⁴⁾ a simplifié la méthode de Bjerknes en lui donnant une forme, en pratique assez souvent employée.

M. Wien⁵⁾, de son côté, a éliminé du procédé de mesure l'effet gênant de l'étincelle, en introduisant l'excitation par chocs.

Rausch von Traubenbergr et Monasch⁶⁾ ont emprunté la méthode de Bjerknes et l'ont développée pour des ondes entretenues et C. Fischer⁷⁾ a montré que, dans ce cas, on mesurait directement le décret du circuit secondaire. Toutes ces méthodes exigent un couplément très lâche entre les deux circuits, et nécessitent la haute fréquence, soit en ondes entretenues, soit en ondes amorties.

Un procédé donné par E. Orlich⁸⁾ résulte de la comparaison de deux capacités au pont de Wheatstone et fournit l'angle de pertes. De même le pont indiqué par Schering⁹⁾ permet de mesurer les pertes de capacités relativement grandes.

Nous nous proposons d'étudier une méthode indiquée par M. Besson¹⁰⁾; elle s'appuie sur la résonance d'un transformateur et elle est d'un emploi technique assez simple. Les résultats trouvés par cette méthode seront vérifiés par la méthode directe du wattmètre. Les pertes trouvées à basse fréquence seront, dans une note, comparées aux pertes à haute fréquence.

¹⁾ W. Siemens, Pogg. Ann. 125, p. 137, 1864.

²⁾ Literaturverzeichnis von E. v. Schweidler, Ann. d. Phys. 24, p. 767, 1907.

³⁾ V. Bjerknes: Wied. Annalen 44, 74, 1891; 55, 121, 1895.

⁴⁾ M. Brandes: Ann. d. Phys. 22, 645, 1907.

⁵⁾ M. Wien: Ann. d. Phys. 25, 625, 1908.

⁶⁾ Traubenbergr et Monasch: Phys. Z. 8, 925, 1907.

⁷⁾ C. Fischer: Ann. d. Phys. 28, 57, 1909.

⁸⁾ E. Orlich: „Kapazität und Induktivität“, Braunschweig 1909, p. 249.

⁹⁾ Schering: Z. f. Instr. 40, p. 124, 1920.

¹⁰⁾ M. Besson: Etude sur la résonance des transformateurs, R.G.E., X., 1921.

Dans ce travail, nous emploierons les notations suivantes:

C	capacité;	$\mathcal{R}$	résistance ohmique d'un enroulement du transformateur;
e	force électromotr.; valeur instantanée;	R	résistance complexe d'un circuit;
E	force électromotrice; valeur efficace;	ϱ	(avec un indice) résistance complexe du transformateur ramené à un circuit unique;
i	intensité du courant; valeur instantanée;	σ	coefficient de dispersion;
I	intensité du courant; valeur efficace;	t	temps;
k	coefficient de couplement;	u	tension aux bornes des condensateurs; valeur instantanée;
l	selfinduction additionnelle;	U	tension aux bornes des condensateurs; valeur efficace;
$\mathcal{L}$	selfinduction d'un enroulement [du transformateur;	Φ	angle de déphasage du courant sur la tension;
L	selfinduction complexe d'un circuit;	δ	angle de pertes;
λ	selfinduction complexe du transformateur ramené à un circuit unique;	ϑ	décrément logarithmique;
M	coefficient d'induction mutuelle;	ω	pulsation du courant;
f	fréquence;	K	constante diélectrique.
r	résistance en parallèle sur une capacité;		
ϱ	(sans indice) résistance en série avec une capacité;		

I. Méthode de résonance.

Dans son étude générale sur la résonance des transformateurs M. Besson¹¹⁾ a indiqué une méthode simple et pratique pour la mesure des pertes d'un condensateur, en admettant que celles-ci soient représentées par une résistance r shuntant le condensateur, supposé sans pertes.

Les équations d'un transformateur dont le secondaire est fermé sur une résistance $\mathcal{R}_{2e}$ en série avec une capacité C shuntée par une résistance r sont:

$$\mathcal{L}_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + \mathcal{R}_1 i_1 = e_1 \quad (1)$$

$$\mathcal{L}_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + \mathcal{R}_2 i_2 + u = 0 \quad (2)$$

$\mathcal{R}_2$ étant la somme des résistances ohmiques de l'enroulement secondaire $\mathcal{R}_{2i}$ et de la résistance extérieure $\mathcal{R}_{2e}$ en série:

$$\mathcal{R}_2 = \mathcal{R}_{2e} + \mathcal{R}_{2i}.$$

$\mathcal{R}_1$ est la résistance ohmique du circuit primaire; u la valeur instantanée de la différence de potentiel aux bornes de la capacité.

Après quelques transformations de l'équation (2) nous avons:

$$\mathcal{L}_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + \mathcal{R}_1 i_1 = e_1, \quad (I)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 = 0, \quad (II)$$

$$\text{où} \quad L_2 = \mathcal{L}_2 - \frac{C r^2}{1 + C^2 \omega^2 r^2} \quad \text{et} \quad R_2 = \mathcal{R}_2 + \frac{r}{1 + C^2 \omega^2 r^2}. \quad (3)$$

Les équations (I) et (II) peuvent être ramenées au cas d'un circuit unique. En éliminant entre (I) et (II) et la dérivée de l'équation (I), i_1 et $\frac{di_1}{dt}$, nous obtenons, en ramenant au secondaire:

$$\varrho_2 i_2 + \lambda_2 \frac{di_2}{dt} = e_2, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \varrho_2 &= R_2 + \mathcal{R}_1 \frac{M^2 \omega^2}{\mathcal{R}_1^2 + \mathcal{L}_1^2 \omega^2} \\ \lambda_2 &= L_2 - \mathcal{L}_1 \frac{M^2 \omega^2}{\mathcal{R}_1^2 + \mathcal{L}_1^2 \omega^2} \\ e_2 &= - \left(\mathcal{R}_1 \frac{de_1}{dt} + \mathcal{L}_2 \omega^2 e_1 \right) \frac{M}{\mathcal{R}_1^2 + \mathcal{L}_1^2 \omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (4')$$

Après dérivation de (II) et en éliminant i_2 et $\frac{di_2}{dt}$, nous aurons en partant du primaire l'équation analogue:

$$\varrho_1 i_1 + \lambda_1 \frac{di_1}{dt} = e_1, \quad (5)$$

¹¹⁾ M. Besson: loc. cit.

où
$$\varrho_1 = \mathcal{R}_1 + R_2 \frac{M^2 \omega^2}{R_2^2 + L_2^2 \omega^2} = \mathcal{R}_1 + R_2 \Theta, \quad (5')$$

$$\lambda_1 = \mathcal{L}_1 - L_2 \frac{M^2 \omega^2}{R_2^2 + L_2^2 \omega^2} = \mathcal{L}_1 - L_2 \Theta, \quad (5'')$$

en appelant:
$$\frac{M^2 \omega^2}{R_2^2 + L_2^2 \omega^2} = \Theta.$$

Les équations (4) et (5) réduisent un transformateur à un circuit unique.

Après intégration de (4) et (5), nous aurons en passant aux valeurs efficaces les formules suivantes:

$$I_1 = \frac{E_1}{\sqrt{\varrho_1^2 + \lambda_1^2 \omega^2}}, \quad (6) \qquad I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\varrho_2^2 + \lambda_2^2 \omega^2}}, \quad (7)$$

où ϱ et λ jouent le rôle de résistances et selfinductions complexes.

Lorsque, sur un transformateur alimenté par un courant alternatif, et dont le secondaire est fermé sur une capacité, nous faisons varier une des grandeurs: selfinduction primaire ou secondaire, capacité, couplement ou fréquence, nous constatons une variation correspondante du courant primaire, du courant secondaire et de la tension aux bornes de la capacité. Les quantités I_1 , I_2 et U passent par un maximum. On dit alors que le transformateur est en résonance. C'est dans ces conditions de résonance que M. Besson a indiqué une méthode pour déterminer les pertes des condensateurs.

Si nous voulons connaître les pertes d'une capacité fixe à une fréquence donnée, le couplement du transformateur étant invariable, nous sommes amenés à réaliser la résonance par variation de la selfinduction primaire ou secondaire. Par commodité expérimentale, il a été fait abstraction de la variation de la self secondaire et l'on a utilisé uniquement la résonance par accord au moyen de la self primaire.

Nous introduisons dans le circuit primaire une selfinduction extérieure l_1 et nous posons la self totale du primaire:

$$L_1 = \mathcal{L}_1 + l_1.$$

$L_1 \omega = x$ est la variable indépendante.

La formule (5') ne change pas et la relation (5'') devient après multiplication par ω :

$$\lambda_1 \omega = x - \Theta L_2 \omega.$$

Dans l'expression (6), I_1 , sera maximum pour $\lambda_1 \omega = 0$ c'est-à-dire pour $x = \Theta L_2 \omega$ car ϱ_1 est indépendant de x ; le courant primaire est alors en phase avec la tension et le groupe formé par le transformateur et la bobine de self additionnelle se comportera, étant en résonance, comme une résistance ohmique.

On a donc, pour valeur du courant maximum:

$$I_1 = \frac{E_1}{\varrho_1}.$$

Quant à l'équation (7) elle peut être amenée, en notant que:

$$E_2 = E_1 \frac{M \omega}{\sqrt{\mathcal{R}_1^2 + \mathcal{L}_1^2 \omega^2}} \quad \text{à} \quad I_2 = \frac{M \omega E_1}{\sqrt{(\mathcal{R}_1^2 + x^2)(\varrho_2^2 + \lambda_2^2 \omega^2)}}. \quad (8)$$

ϱ_2 et λ_2 sont données par (4') et sont par conséquent des fonctions de x . Le maximum de I_2 a lieu pour la même valeur de x qui rend I_1 maximum, soit $x = \Theta L_2 \omega$.

Appelons U la valeur efficace de la tension aux bornes du condensateur:

$$U = \frac{I_2 r}{\sqrt{1 + r^2 \omega^2 C^2}} = \frac{E_2 r}{\sqrt{(1 + C^2 \omega^2 r^2)(\varrho_2^2 + \lambda_2^2 \omega^2)}}$$

expression qui nous montre que U ne diffère de I_2 que par le facteur:

$$\frac{r}{\sqrt{1 + C^2 \omega^2 r^2}}.$$

La condition du maximum de U sera donc la même que pour I_2 . Lorsqu'un transformateur est fermé sur des condensateurs et que la selfinductance primaire varie, les courants primaire et secondaire atteignent leur maximum en concordance, quelles que soient les pertes des condensateurs.

La condition de résonance $x = \theta L_2 \omega$ est indépendante de R_1 , c'est-à-dire les résistances primaires ne déplacent pas le point de résonance.

Les résistances placées en série avec le condensateur déplacent le point de résonance, c'est-à-dire celle-ci se produit pour une selfinductance primaire plus faible. Il en est de même lorsqu'on fait décroître les résistances shuntant le condensateur. Les pertes des condensateurs peuvent être équiparées soit à une résistance placée en série avec le condensateur supposé sans pertes, soit avec une résistance placée en parallèle sur les bornes des condensateurs.

En outre, l'augmentation de la résistance du secondaire abaisse les maxima et diminue l'acuité de la résonance. L'effet des résistances en parallèle sur la capacité est semblable.

La résonance peut toujours être réalisée lorsque $\mathcal{L}_1 \omega < x$. Il suffit alors d'ajouter au circuit primaire une selfinductance l_1 telle que:

$$\mathcal{L}_1 \omega + l_1 \omega = x.$$

Il peut arriver que la résonance soit impossible, quoique la valeur de x soit légèrement supérieure à la réactance de l'enroulement primaire. Tel est le cas lorsque les pertes du condensateur déplaçant le point de résonance amènent x à être plus petit que $L_1 \omega$. Nous voyons donc que la résonance peut être empêchée, pour une capacité donnée, uniquement par une trop grande valeur de la selfinduction de l'enroulement primaire. Par contre, la résonance est toujours possible par une variation combinée de la capacité secondaire et de la selfinduction primaire.

Pour déterminer la résistance r shuntant le condensateur, par laquelle peuvent être représentées les pertes, nous partons de l'expression générale du courant primaire à la résonance, qui alors se réduit à:

$$I_1 = \frac{E_1}{\varrho_1};$$

I_1 et E_1 sont le courant et la tension aux bornes du circuit primaire au moment de la résonance, grandeurs qui peuvent être mesurées. Elles nous donnent la résistance apparente ϱ_1 du transformateur.

Notons encore que:

$$\varrho_1 = \mathcal{R}_1 + \theta R_2 \quad (5')$$

$$\theta = \frac{M^2 \omega^2}{R_2^2 + L_2^2 \omega^2} = \frac{I_2^2}{I_1^2}$$

rapport trouvé à l'aide des formules (8) et (6) en remplaçant ϱ_2 , λ_2 , ϱ_1 et λ_1 par leurs valeurs.

Or d'après (3):

$$R_2 = \mathcal{R}_2 + \frac{r}{1 + C^2 \omega^2 r^2}.$$

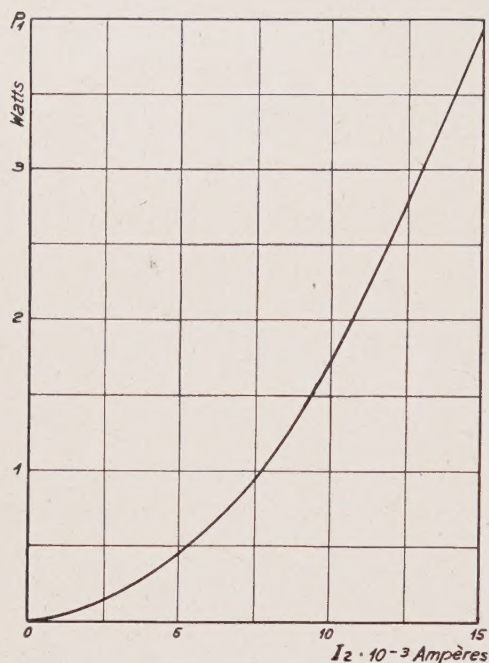


Fig. 1.

ou bien en remplaçant a par sa valeur:

$$r = \frac{I_2^2}{C^2 \omega^2 (E_1 I_1 - \mathcal{R}_1 I_1^2 - \mathcal{R}_2 I_2^2)} \quad (9)$$

La mesure se fait en fermant, à travers un milliampèremètre, le secondaire du transformateur sur la capacité dont on cherche les pertes. En produisant la résonance par variation de la selfinduction primaire additionnelle, on mesure E_1 , I_1 et I_2 , grandeurs qui permettraient immédiatement de connaître θ et a et enfin de calculer r , si les pertes du transformateur ne venaient pas introduire une importante cause d'erreur.

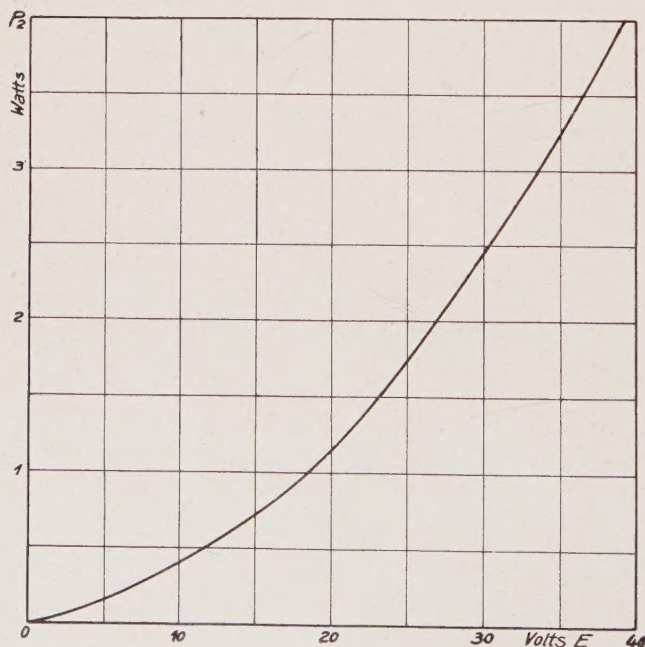


Fig. 2.

L'énergie dissipée dans le primaire du transformateur ne l'est pas uniquement sur sa résistance ohmique. Une première portion sert au travail de magnétisation du fer et nous savons que celui-ci est proportionnel à $B^{1,6}$. C'est donc la valeur du flux B qui fixera les pertes dans le fer, si elles sont uniquement dues au travail d'hystérésis.

En plus des pertes hystéré-

Posons:

$$R_2 - \mathcal{R}_2 = a = \frac{r}{1 + C^2 \omega^2 r^2}.$$

De cette expression, nous tirons la valeur de r :

$$r = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4 a^2 C^2 \omega^2}}{2 a C^2 \omega^2}.$$

Des deux valeurs de r , il faut prendre la plus grande. La plus petite serait inférieure à $r = \frac{1}{C \omega}$, qui est la réactance du condensateur; les pertes d'un condensateur sont en effet, toujours représentées par une résistance très supérieure à sa capacitance.

Comme $4 a^2 C^2 \omega^2$ est pour nous toujours négligeable devant l'unité — la valeur de $4 a^2 C^2 \omega^2$ varie entre 0,005 et 0,0005 pour les capacités utilisées — la formule finale pour la détermination de r , aura la forme:

$$r = \frac{1}{a C^2 \omega^2}$$

tiques, il existe dans le fer des pertes causées par les courants tourbillonnaires induits dans les masses, et qui sont proportionnelles à B^2 . En mesurant l'énergie dépensée dans le circuit primaire d'un transformateur ouvert, on peut obtenir, après déduction de l'énergie consommée dans la résistance ohmique, la relation, sous forme de courbe, qui lie le voltage à l'énergie dissipée dans le fer. Ce procédé de détermination des pertes ne peut être légitimement employé que si la fréquence du courant est constante.

Mais il faut encore faire entrer en ligne de compte les autres pertes que cause dans le cuivre des bobinages, le flux magnétique dispersé en raison de circuits magnétiques imparfaits. Ces dernières pertes seront petites dans un transformateur industriel et, au contraire, assez importante dans une bobine d'induction où le circuit magnétique est ouvert. L'énergie dépensée de ce fait est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.

En considérant le fait que, dans un transformateur, le flux total ne varie que très peu avec la charge, à cause de l'effet antagoniste du flux secondaire sur le flux primaire, nous admettrons que les pertes dans le fer, dues à la magnétisation, sont constantes pour une tension donnée. En déterminant l'augmentation procen-

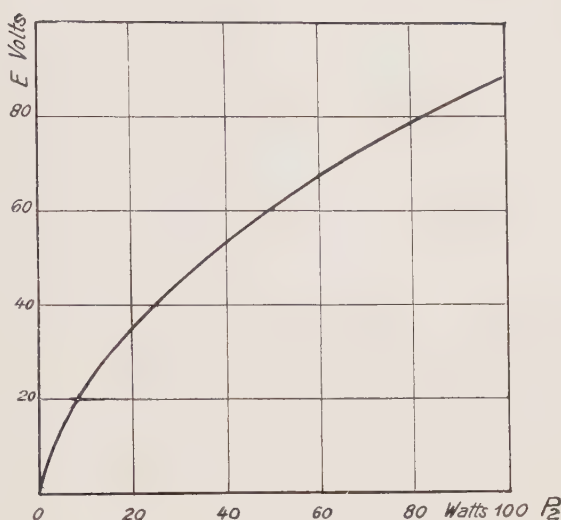


Fig. 3.

tuale de la tension depuis la marche à vide jusqu'à la marche sous le courant utilisé dans les mesures, on pourrait introduire une correction; celle-ci permet de tenir compte des variations des pertes en fonction de la charge.

Les pertes dues aux courants tourbillonnaires dans les conducteurs sont fonction de l'intensité du courant. Lorsque le transformateur a son secondaire en court-circuit, l'énergie dépensée et mesurée au primaire est uniquement l'énergie dissipée par des cou-

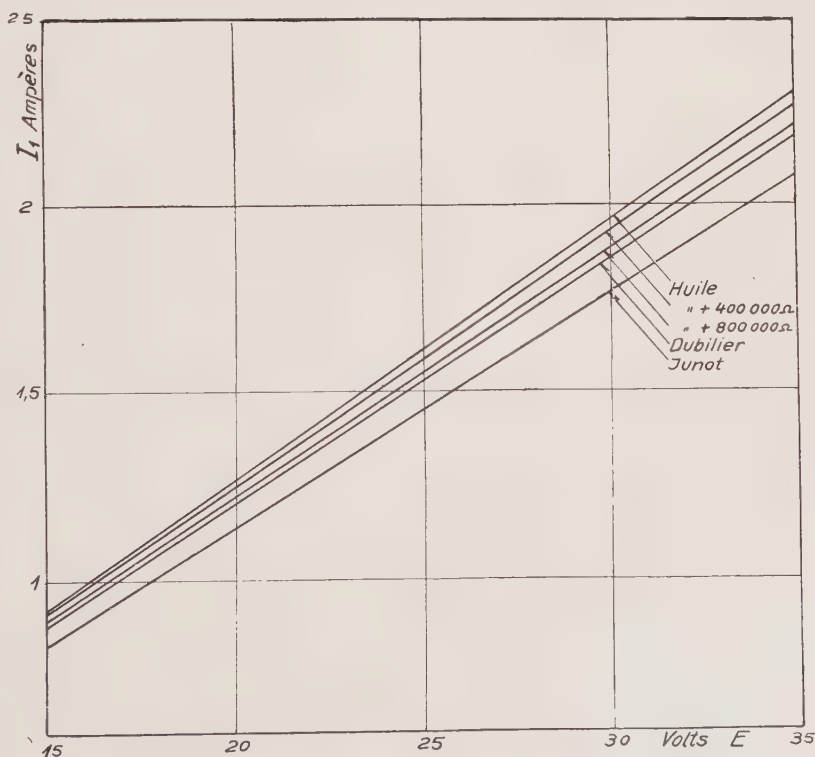


Fig. 4.

rants, augmentées des pertes ohmiques primaires et secondaires. On peut donc dresser la courbe de ces pertes de dispersion en relation avec l'intensité du courant secondaire.

Les mesures ont été opérées avec une bobine d'induction à noyau ouvert et avec un transformateur industriel de 150/20 000 volts. Le courant alternatif utilisé à 50 périodes ($\omega = 314$) est produit par une machine à courant monophasé, entraînée par un moteur alimenté au moyen d'une batterie d'accumulateurs.

Le but que l'on poursuit le plus souvent en mettant un transformateur à la résonance, est d'obtenir une tension supérieure à celle que l'on obtient dans les conditions ordinaires. Le coefficient de surtension tend vers l'unité pour un transformateur à couplage très serré. Il est d'autant plus grand que celui-ci est plus petit. Mais la recherche de la tension maximum n'a guère d'importance pour nos mesures. Ce qui nous intéresse, c'est l'acuité de la résonance. Abstraction faite des pertes des condensateurs, l'acuité de la résonance est diminuée par les résistances ohmiques du secondaire tandis que les résistances ohmiques du primaire n'ont, à ce point de vue, aucune influence¹²⁾. La résistance du secondaire de la bobine est $R_2 = 42,2 \cdot 10^3 \Omega$, celle du transformateur de $3,13 \cdot 10^3$. Quant à l'acuité de la résonance, le transformateur est donc préférable à la bobine.

La résonance vient de plus en plus aiguë à mesure que la capacité au secondaire augmente. Pour réaliser la résonance, la capacité nécessaire est d'autant plus grande que la selfinduction du primaire est petite, donc la mesure des pertes des grandes capacités sera plus facile avec une bobine qu'avec un transformateur de même puissance.

Dans notre cas, la résistance apparente de l'enroulement primaire de la bobine d'induction varie avec l'intensité du courant de $57,5 \Omega$ à 60Ω , celle du transformateur, de 30Ω à 37Ω . Pour la même selfinduction additionnelle au circuit pri-

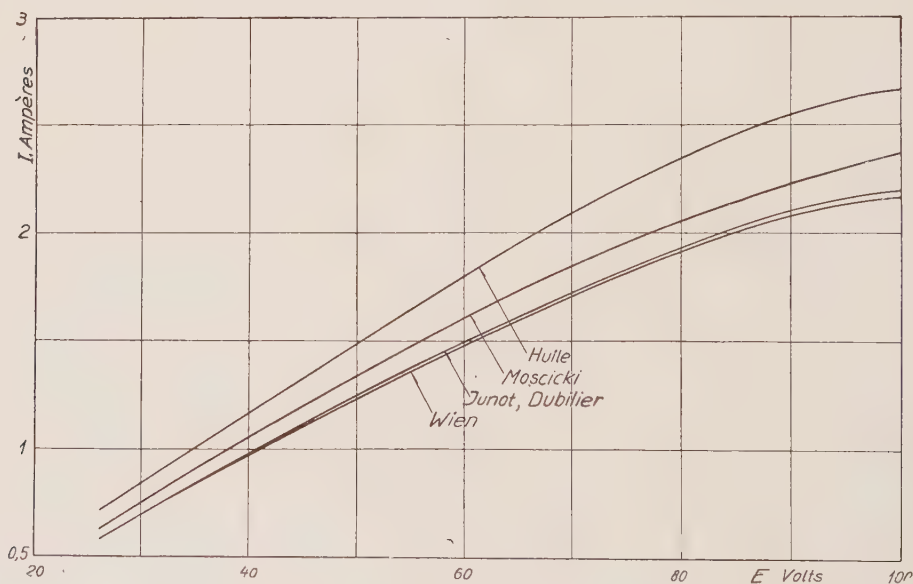


Fig. 5.

maire, la capacité nécessaire pour mettre le transformateur en résonance est à peu près le double de celle qui réalise la résonance sur la bobine. Cependant, pour une même capacité fermée sur la bobine ou sur un transformateur ayant même selfinduction primaire, il faut une self additionnelle plus petite dans le second cas

¹²⁾ Voir Besson, loc. cit.

que dans le premier. La dispersion du transformateur étant plus petite, le flux secondaire qui agit en opposition avec le flux primaire est plus grand, toute proportion gardée, que dans la bobine, la diminution de la selfinduction apparente est aussi plus forte.

Pour une capacité donnée, la mise en résonance d'un transformateur est possible à la condition que $\mathcal{L}_1 \omega = x$. En ajoutant au primaire des selfinductances additionnelles, la résonance est toujours possible pour des capacités plus petites que la précédente, mais non pas pour des capacités plus grandes. Le domaine, dans lequel un transformateur peut être mis en résonance, est donc d'autant plus grand que la selfinduction de l'enroulement primaire est petite.

Ce qui nous intéresse le plus, c'est de savoir comment se comporteront la bobine et le transformateur utilisés au point de vue des pertes. Nous avons distingué entre pertes dans le fer et pertes à cause de la dispersion. Les pertes dans le fer seront, dans le transformateur, beaucoup plus grandes que dans la bobine. Elles sont dans la proportion de $1:\sigma$ pour une même différence de potentiel aux bornes de l'enroulement primaire. Les pertes par dispersion, au contraire, sont, dans un transformateur industriel, négligeables, σ étant très petit, tandis qu'elles sont assez considérables pour une bobine à noyau ouvert.

En utilisant une bobine, nous aurons donc deux corrections à faire, tandis qu'elles se réduisent à une seule pour le transformateur.

Afin de déterminer dans la bobine les pertes causées par la dispersion, nous avons mis le secondaire en court-circuit à travers un milliampèremètre et mesuré pour des valeurs de I_2 croissant de 6 à 20 mA, l'énergie consommée dans le circuit primaire. Cette énergie, diminuée de $(I_1^2 \mathcal{R}_1 + I_2^2 \mathcal{R}_2)$, énergie consommée par les résistances ohmiques du circuit primaire et secondaire, correspondra

aux pertes de dispersion, que nous désignons par P_1 . Une courbe de P_1 en fonction de I_2 nous donnera pour chaque valeur de I_2 la valeur correspondante de P_1 (fig. 1).

Les fig. 2 et 3 représentent les pertes dans le fer P_2 en fonction de la différence de potentiel aux bornes de l'enroulement primaire, soit les pertes de la bobine (fig. 2), soit du transformateur (fig. 3), le circuit secondaire étant ouvert.

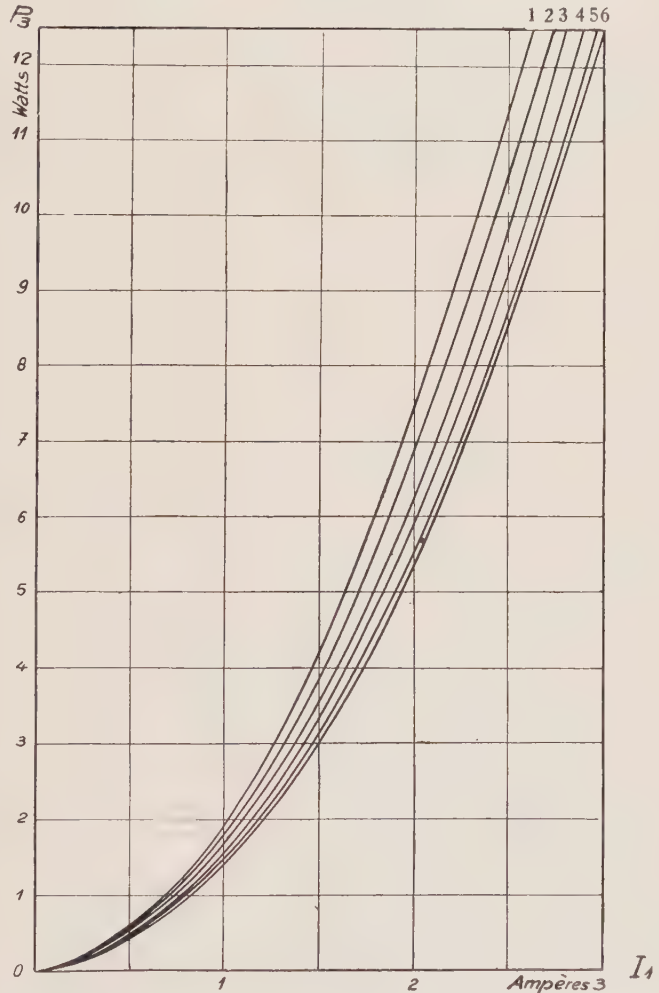


Fig. 6.

Pour la commodité des mesures, nous avons encore dressé les fig. 4 et 5 qui donnent, pour les différents condensateurs, la valeur de la différence de potentiel E aux bornes du primaire de bobine ou du transformateur en fonction de I_1 à la résonance. Pour un courant primaire I_1 à la résonance, on lit sur la fig. 4 ou 5 la valeur correspondante de E à laquelle correspondra sur la fig. 2 ou 3 la valeur cherchée de P_2 .

Exemple. Supposons avoir réalisé la résonance de la bobine avec le condensateur Junot au secondaire. Pour $I_1 = 1,5$ ampères la fig. 4 droite Junot donne $E = 25,8$ volts; pour $E = 25,8$ volts, la fig. 2 donne la valeur de $P_2 = 1,85$ watts. De même pour les fig. 3 et 4 si les mesures seront effectuées avec le transformateur.

Quant à l'énergie consommée dans la selfinduction additionnelle, P_3 , nécessaire pour réaliser la résonance, nous l'avons considérée uniquement comme fonction du courant et dressé la courbe des I_1 et des watts pour différentes positions du noyau. Cela est justifié, car pour une même intensité du courant dans la self additionnelle, la différence de potentiel à la résonance du système est la même que sous des conditions ordinaires.

Le faisceau de la fig. 6 nous permet de lire pour un courant de résonance I_1 et une position donnée du noyau, figurée par les numéros 1 à 6, la valeur correspondante de l'énergie totale en watts consommée dans celle-ci (pertes ohmiques et de magnétisation).

Introduisons ces pertes dans la formule (9); nous remplaçons le terme $I_1^2 \mathcal{R}_1$ par:

$$I_1^2 \mathcal{R}' + P_1 + P_2 + P_3, \\ r = \frac{I_2^2}{C^2 \omega^2 [I_1 E_1 - (I_1^2 \mathcal{R}' + P_1 + P_2 + P_3) - I_2^2 \mathcal{R}_2]} \quad (10)$$

$\mathcal{R}'$ est la résistance ohmique de l'enroulement primaire de la bobine (1,03 Ω) ou du transformateur (0,14 Ω).

A l'aide de la méthode indiquée, nous avons, entre autres, déterminé les pertes des condensateurs suivants:

1 ⁰ Condensateur <i>réglable à huile I</i>	$C = 3,77 \cdot 10^{-9} F$
(modèle Boas; huile de vaseline, const. diélectr. $K = 2,15$)	
2 ⁰ Condensateur <i>à huile réglable II</i>	$C = 4,21 \cdot 10^{-9} F$
(modèle Boas; huile de transformateur; $K = 2,4$)	
3 ⁰ Condensateur <i>Dubilier</i> (T. S. F.)	$C = 3,60 \cdot 10^{-9} F$
(tension d'usage 20 000 volts)	
4 ⁰ Condensateur <i>Junot</i> (T. S. F.)	$C = 3,55 \cdot 10^{-9} F$
(tension d'usage 20 000 volts)	
5 ⁰ Condensateur <i>Moscicki I</i>	$C = 3,740 \cdot 10^{-9} F$
6 ⁰ " " <i>II</i>	$C = 3,660 \cdot 10^{-9} F$
(en forme de tube, modèle T. S. F. pour 50 000 volts ¹³⁾)	
7 ⁰ Condensateur <i>à acide carbonique de Wien</i> ¹⁴⁾	$C = 1,8 \cdot 10^{-9} F$

Dans les mesures effectuées avec la bobine, nous avons tenu compte de sa capacité répartie qui est d'environ $0,06 \cdot 10^{-9} F$ (1–2 % de la capacité utilisée) en l'ajoutant à la valeur de la capacité.

Toutes les capacités ont été mesurées au pont de Wheatstone par comparaison avec un condensateur étalon. La valeur de la capacité n'a pas été sensiblement altérée en mettant en série avec celle-ci des résistances de l'ordre de grandeur de celles que nous avons employées dans les mesures.

¹³⁾ J. Moscicki: E. T. Z. 25, p. 527, 1904.

¹⁴⁾ M. Wien: Ann. d. Phys. 29, p. 681, 1909.

Les résultats expérimentaux sont réunis dans les tableaux I et II ($\omega = 314$).

Résultats expérimentaux avec la bobine d'induction ($\omega = 314$).

Tableau I.

I_2 A	U Volts	r Ω	ϱ Ω	δ ($\text{tg } \delta = \varrho \omega C$)	$\pi \text{ tg } \delta = \vartheta$	Pertes o/o
I. Condensateur à huile I $C = 3,832 \cdot 10^{-9} F$						
$6,59 \cdot 10^{-3}$	5 474	$25,4 \cdot 10^6$	27 165	$1^0 52' 23''$	0,103	3,27
7,73	6 421	24,11	28 620	$1^0 57' 24''$	0,108	3,44
9,11	7 567	21,2	32 550	$2^0 14' 37''$	0,123	3,92
11,28	9 370	22,11	31 210	$2^0 9' 6''$	0,118	3,75
II. Condensateur Dubilier $C = 3,65 \cdot 10^{-9} F$						
7,06	6 157	75,8	10 030	$0^0 39' 32''$	0,0365	1,15
8,93	7 785	70,9	10 720	$0^0 42' 16''$	0,0386	1,23
11,72	10 220	67,5	11 260	$0^0 44' 24''$	0,040	1,29
12,52	10 915	65,5	11 610	$0^0 45' 45''$	0,042	1,33
III. Condensateur Junot $C = 3,60 \cdot 10^{-9} F$						
6,75	5 968	80,96	9 657	$0^0 37' 32''$	0,0343	1,09
9,01	7 967	78,35	10 020	$0^0 38' 58''$	0,0356	1,13
10,8	9 549	71,24	10 670	$0^0 41' 29''$	0,038	1,21
12,75	11 273	62,9	12 430	$0^0 48' 19''$	0,0442	1,41

Résultats expérimentaux avec un transformateur à circuit magnétique fermé ($\omega = 314$).

Tableau II.

I_2 A	U Volts	r Ω	ϱ Ω	δ ($\text{tg } \delta = \varrho \omega C$)	$\pi \text{ tg } \delta = \vartheta$	Pertes o/o
I. Condensateurs à huile I et II en parallèle. $C = 8,02 \cdot 10^{-9} F$.						
$17,47 \cdot 10^{-3}$	6 934	$11,3 \cdot 10^6$	13 940	$2^0 0' 42''$	0,1103	3,51
21,67	8 601	9,5	16 580	$2^0 23' 33''$	0,131	4,18
28,24	11 208	8,2	19 210	$2^0 46' 16''$	0,152	4,84
II. Condensateurs Junot et Dubilier en parallèle. $C = 7,15 \cdot 10^{-9} F$.						
28,43	12 656	36,9	5 372	$0^0 41' 28''$	0,0379	1,21
III. 2 Condensateurs Moscicki en parallèle. $C = 7,4 \cdot 10^{-9} F$.						
21,61	9 295	31,5	5 874	$0^0 46' 56''$	0,043	1,37
29,05	12 496	31,2	5 931	$0^0 47' 23''$	0,0433	1,28

Voici deux exemples détaillés:

¹⁰ La mesure a été faite avec la *bobine d'induction*. Le secondaire était fermé sur le condensateur à huile I. $C = 3,832 \cdot 10^{-9} F$.

$$\begin{aligned}
 I_2 &= 11,28 \cdot 10^{-3} A; & \omega &= 314; \\
 I_1 &= 1,82 A; & C^2 \omega^2 &= 144,93 \cdot 10^{-14}; \\
 E_1 &= 11,97 V; & I_1^2 \mathcal{R}' &= 3,41 W; \\
 E_1 I_1 &= 21,78; & I_2^2 \mathcal{R}_2 &= 5,37 W; \\
 P_1 &= 2,22 W; & & \text{d'où} \\
 P_2 &= 2,16 W; & r &= 22,11 \cdot 10^6 \Omega. \\
 P_3 &= 4,65 W;
 \end{aligned}$$

2° La mesure a été effectuée sur un *transformateur* à circuit magnétique fermé. Le secondaire est fermé sur les condensateurs Moscicki en parallèle. $C = 7,4 \cdot 10^{-9} F$; $C^2 \omega^2 = 540,4 \cdot 10^{-14}$.

$$\begin{aligned} I_2 &= 29,05 \cdot 10^{-3} A; & P_1 &= 0; \\ I_1 &= 2,177 A; & P_2 &= 93,3 W; \\ E_1 &= 50,63 V; & P_3 &= 8,6 W \\ E_1 I_1 &= 110,2; & & \text{pour les deux en parallèle.} \\ I_1^2 R' &= 0,66; & I_2^2 R_2 &= 2,64 \text{ d'où } r = 31,2 \cdot 10^6 \Omega. \end{aligned}$$

Pour une capacité parfaite, avec un diélectrique sans pertes, l'intensité du courant avance de 90° sur la tension aux bornes du condensateur. Dans ce cas, l'énergie absorbée est nulle.

Pour un diélectrique imparfait et en admettant que les pertes puissent être équiparées à une résistance en parallèle ou en série, le décalage n'est plus de 90° mais d'un certain angle qui en diffère de δ . Nous l'appelons angle de pertes et l'énergie absorbée est donnée par l'expression:

$$W = I_2 U \sin \delta.$$

La valeur naturelle de $\sin \delta$ représente donc les pertes en %.

Il serait rationnel de distinguer divers genres de pertes¹⁵⁾: Celles qu'on peut comparer à une résistance et celles dues à la viscosité des diélectriques, appelée aussi hystérésis diélectrique. Comme l'a montré Press¹⁶⁾, l'hystérésis cyclique conduit à la conception de constantes diélectriques complexes par opposition à celle que l'on considère d'ordinaire.

Nous admettons, en première approximation, qu'une capacité imparfaite a une action équivalente à la combinaison d'une capacité parfaite avec une résistance. Cette résistance peut être supposée en série avec le condensateur ou bien en parallèle¹⁷⁾.

L'angle des pertes correspondant à une résistance r en parallèle sur la capacité est donné par:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{r \omega C}.$$

Pour capacité et résistance ϱ en série, nous aurons:

$$\operatorname{tg} \delta = \varrho \omega C$$

à l'aide des formules:

$$\varrho = \frac{r}{1 + r^2 \omega^2 C^2} \quad \text{et} \quad r = \varrho + \frac{1}{\varrho \omega^2 C^2}$$

nous passons des pertes représentées par une résistance ϱ en série à la résistance r correspondante aux mêmes pertes en parallèle.

C , δ , r et ϱ sont des grandeurs caractéristiques pour représenter l'effet d'une capacité. Celui-ci ne peut être complètement connu que si l'on connaît C et la valeur de δ , de r ou de ϱ , par laquelle on suppose représentées respectivement ses pertes.

Le décrétement logarithmique ϑ est donné par la relation:

$$\vartheta = \frac{\varrho}{2L} T = \varrho \omega C \pi = \pi \operatorname{tg} \delta$$

ou bien pour δ petit: $\vartheta = 0,912 \cdot 10^{-3} \cdot \delta.$

¹⁵⁾ Granier: R. G. E. 30 sept. 1922.

¹⁶⁾ Press: R. G. E. 30 déc. 1922.

¹⁷⁾ Schott: Jahrb. d. drahtl. Telegr. August 1921.

Les valeurs de δ , ϑ , ϱ et du % correspondant aux valeurs de r trouvées dans les mesures, ont été calculées à l'aide des formules que nous venons d'indiquer. Elles sont réunies dans les tableaux I et II.

Nous avons encore étendu nos mesures plus loin afin d'en vérifier la valeur, en ajoutant au secondaire, en série avec la capacité, des résistances ohmiques ϱ' connues et sans self.

D'après ce qui précède, la valeur de ϱ que fourniront les mesures, doit être la somme de la résistance ϱ' ajoutée et de la résistance ϱ'' représentative des pertes du condensateur. Celle-ci est connue par les mesures précédentes.

Par exemple, la mesure sur le condensateur Junot a donné une perte équivalente à une résistance ϱ'' en série égale à 10 000 Ω . Nous ajoutons en série une résistance de 11 600 Ω , sans self qui doit figurer des pertes supplémentaires. Les observations et le calcul nous ont donné dans ce cas une résistance de pertes en parallèle $r = 36,10^6 \Omega$. Cette résistance joue le même rôle qu'une résistance ϱ en série de 21 300 Ω ; or $\varrho' + \varrho''$ est égale à 21 600 Ω .

La comparaison des résultats obtenus avec la bobine et le transformateur peut s'opérer pour les condensateurs Junot et Dubilier. D'après les mesures obtenues avec la bobine (voir tableau I), l'angle de pertes δ du condensateur Junot est à peu de chose près le même que celui du condensateur Dubilier. Il varie avec la tension de 0° 40' à 0° 45'. En raison de cette égalité des pertes, les pertes du système formé par les deux condensateurs en parallèle resteront les mêmes que pour un seul. Ainsi nous avons trouvé en faisant l'expérience avec le transformateur, un angle $\delta = 0° 41,5'$, les valeurs de ϱ et r étant évidemment deux fois plus petites.

Les pertes trouvées avec le transformateur pour les deux condensateurs à huile et les deux condensateurs Moscicki en parallèle correspondent de même aux pertes trouvées pour les mêmes capacités avec la méthode directe du wattmètre, décrite plus loin.

Abstraction faite des difficultés des lectures bien exactes de I_1 et E_1 , à la résonance, la valeur de la méthode que nous venons d'étudier et l'exactitude de ses résultats dépend surtout de la précision avec laquelle sont déterminées les pertes du transformateur ou de la bobine. Le produit $E_1 I_1$ à la résonance est d'autant plus grand que les pertes du condensateur sont grandes. La parenthèse au dénominateur de la formule (10) a dans ce cas-là une valeur suffisamment grande (elle varie pour le condensateur à huile I de 1 à 4, pour I_1 , passant de 1 à 2 A), pour que des erreurs de l'ordre de 0,1 W dans la détermination des pertes n'aient guère d'influence sur le résultat.

Pour les condensateurs Junot et Dubilier, la valeur de la parenthèse est déjà beaucoup plus petite. Pour la même variation du courant, elle passe de 0,4 à 2 (bobine). Ici, une erreur de 0,1 watt dans la détermination des pertes a une influence considérable sur la valeur de r . L'exactitude de la méthode diminue donc rapidement avec r croissant, pour une valeur donnée des pertes dans le fer. Le transformateur le plus propre à ce genre de mesures devrait avoir des pertes les plus faibles possible.

II. Méthode directe du wattmètre.

La plus simple méthode de mesure des pertes dans les condensateurs est évidemment la mesure directe au moyen du wattmètre de l'énergie consommée par la capacité. Au point de vue expérimental, l'application de cette méthode est limitée par la sensibilité très grande que doit posséder le wattmètre.

L'énergie W mesurée nous permet de connaître la valeur de la résistance ϱ supposée en série, qui est équivalente aux pertes:

$$\varrho = \frac{W}{I^2}.$$

I étant le courant à travers la capacité, W est mesuré directement en watts. De ϱ , nous passons par les formules indiquées plus haut aux valeurs correspondantes de r , δ , ϑ .

L'électrodynamomètre utilisé, construit par Siemens & Halske¹⁸⁾ se compose de deux bobines fixes entre lesquelles est suspendue une bobine mobile munie d'un miroir permettant de faire la lecture des déviations par la méthode de Poggendorf. Pour éviter l'action du champ magnétique terrestre, l'appareil a été placé de telle sorte que le plan des spires des bobines fixes coïncide avec le méridien magnétique. Le plan des spires de la bobine mobile est perpendiculaire au plan des spires des bobines fixes. Les bobines fixes ayant une résistance totale de 297Ω ont été employées en série pour la mesure de l'intensité, la bobine mobile de $176,6 \Omega$ pour la mesure de la tension.

Le wattmètre a été étalonné en courant continu.

On sait que dans un instrument électrodynamique, la puissance est représentée en général par:

$$W = C \frac{\alpha}{\sin \gamma} ;$$

où γ représente l'angle entre les axes des deux bobines.

On s'est arrangé de façon que γ soit très peu différent de 90° . En effet, l'échelle étant à $2,5$ m de distance du miroir, la déviation maximum de 50 cm qui correspond à $3,44 \cdot 10^{-4}$ watts donne $\sin \gamma = 0,9951$. Pour la plupart de nos mesures, la déviation ne dépassait pas 40 cm, ce qui correspondrait à $\sin \gamma = 0,997$. Dans nos conditions de mesure, le graphique représentant les déviations en fonction de $e i$ est, dans le domaine utilisé, une ligne droite.

Pour nous assurer que la calibration en courant continu était encore applicable à un courant alternatif, c'est-à-dire que la résistance de la bobine de tension était indépendante de la fréquence¹⁹⁾, nous l'avons vérifiée pour un courant de 50 périodes avec des résistances R connues et sans self. Pour une même déviation, l'énergie lue sur la droite de calibration à courant continu correspondait à l'énergie consommée sur cette résistance ($I^2 R$), ce qui montre que la calibration était valable pour un courant alternatif de 50 périodes.

La selfinduction de la bobine mobile ne pouvait pas apporter d'erreur notable. En effet, elle est de $0,01$ Henry.

Le décalage produit par cette self est pour la plus grande partie des mesures plus petit que $1'$ et au plus égal à $1'$. La selfinduction de la bobine fixe du wattmètre, d'ailleurs petite, n'entre pas en ligne de compte.

Dispositif expérimental.

La capacité dont on veut mesurer les pertes est fermée en série avec un milli-ampèremètre et les bobines fixes du wattmètre sur le secondaire d'une bobine d'induction; elle est alimentée par un courant alternatif, dont on peut varier la fréquence de 40 à 60 . Le secondaire d'un transformateur de mesure Siemens, dont le rapport de transformation est constant dans les limites employées, est fermé sur un voltmètre permettant de connaître la tension sur le condensateur, réduite dans la proportion de 20000 à 120 volts.

Cette tension réduite donne, à travers la résistance R , dans la bobine mobile du wattmètre un courant proportionnel à la tension mesurée. Pour éviter les attractions électrostatiques causées par une trop grande différence de potentiel entre les

¹⁸⁾ Siemens & Halske, Preisliste 56, 1912.

¹⁹⁾ Winkelmann: Handbuch der Physik, Bd. 4, p. 297.

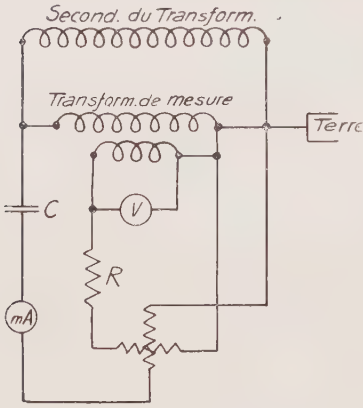


Fig. 7.

bobines, un pôle commun, réunissant une borne du secondaire de la bobine, une borne primaire du transformateur de mesure et de la bobine mobile du wattmètre, a été mis à la terre.

Le passage d'un courant à travers la capacité produisait une déviation de la bobine mobile du wattmètre. La valeur correspondante des watts lue sur la droite de calibration multiplié par le facteur de proportionnalité du système de mesure, donne directement l'énergie absorbée dans la capacité. La résistance ϱ qui, équivalente aux pertes, est supposée en série avec la capacité se calcule immédiatement. Une correction sur l'énergie totale indiquée par le wattmètre a été introduite en raison de la résistance des instruments de mesure (milliampèremètre et bobine fixe du wattmètre). Au primaire du transformateur, le voltmètre était shunté par la résistance totale du circuit mobile du wattmètre. Celle-ci était suffisamment grande pour ne pas changer le rapport du transformateur de mesure.

L'intensité et la puissance du courant étant connues nous pouvions, toutes corrections effectuées, calculer ϱ , ou r et enfin δ .

Les mesures ont été exécutées soit pour une capacité unique, soit pour deux capacités en série ou en parallèle. Comme ϱ est mesuré indépendamment de la valeur de la capacité, il est évident que pour deux capacités en série la valeur de ϱ trouvée en mesurant W est la somme des ϱ trouvés pour chaque capacité seule, car les résistances équivalentes aux pertes des deux capacités s'ajoutent.

D'après les mesures faites, le condensateur à huile I donne, par exemple, pour un courant de 50 périodes $\varrho' = 28460 \Omega$, le condensateur à huile II, pour la même fréquence $\varrho'' = 43100 \Omega$. Pour les deux en série, les mesures donnent $\varrho = 72400 \Omega$ (tableaux III et IV), au lieu de 71,560; différence 1,1 %.

Tableau III.

I_2 A	W	U Volts	r Ω	ϱ Ω	δ $\text{tg } \delta = \varrho \omega C$	ϑ $(\pi \cdot \text{tg } \delta)$	Pertes %	N
I. Condensateur à huile I $C = 3,77 \cdot 10^{-9} F$.								
$6 \cdot 10^{-3}$	1,504	5 940	$26,7 \cdot 10^6$	$4,17 \cdot 10^4$	$20^\circ 15' 45''$	0,1242	3,94	40
8	2,65	8 100	26,9	4,14	$20^\circ 14' 43''$	0,1233	3,92	
10	4,10	10 110	27,1	4,1	$20^\circ 13' 32''$	0,1221	3,9	
8	1,8022	6 650	25,3	2,816	$10^\circ 54' 33''$	0,1048	3,33	50
9	2,305	7 540	25,0	2,846	$10^\circ 55' 51''$	0,1059	3,37	
10	2,865	8 330	24,9	2,865	$10^\circ 56' 35''$	0,1066	3,39	
12	4,2856	10 040	24,0	2,976	$20^\circ 1' 8''$	0,1107	3,52	
8	1,256	5 510	25,25	1,96	$10^\circ 35' 45''$	0,0875	2,78	60
9	1,60	6 288	25,0	1,975	$10^\circ 36' 13''$	0,0879	2,79	
10	1,956	6 870	25,25	1,96	$10^\circ 35' 45''$	0,0875	2,78	
12	2,8996	8 280	24,57	2,013	$10^\circ 38' 19''$	0,0899	2,86	
II. Condensateur à huile II.								
8	3,986	7 295	14,35	6,23	$30^\circ 46' 11''$	0,207	6,57	40
9	5,301	8 235	13,67	6,54	$30^\circ 57' 24''$	0,217	6,9	
10	6,634	9 170	13,48	6,634	$40^\circ 0' 39''$	0,22	7,0	
8	2,734	6 020	13,4	4,27	$30^\circ 13' 45''$	0,177	5,63	50
9	3,488	6 760	13,29	4,31	$30^\circ 15' 7''$	0,178	5,67	
10	4,363	7 460	13,12	4,36	$30^\circ 17' 50''$	0,181	5,75	
11	5,421	8 250	12,77	4,48	$30^\circ 23' 16''$	0,186	5,91	
8	1,875	4 970	13,61	2,92	$20^\circ 39' 8''$	0,1455	4,63	60
9	2,402	5 580	13,43	2,96	$20^\circ 41' 19''$	0,1475	4,69	
10	2,94	6 190	13,52	2,94	$20^\circ 40' 13''$	0,1465	4,66	
12	4,377	7 420	13,03	3,05	$20^\circ 46' 13''$	0,152	4,83	

Tableau IV.

I_2 A	W	U Volts	r Ω	ϱ Ω	δ $\text{tg } \delta = \varrho \omega C$	ϑ $(\pi \cdot \text{tg } \delta)$	Pertes %	N
I. Condensateurs à huile I et II en parallèle.								
$6 \cdot 10^{-3}$	0,8759	2 947	$10,13 \cdot 10^6$	$2,43 \cdot 10^4$	$20^\circ 48' 16''$	0,154	4,89	40
8	1,533	3 870	10,25	2,4	$20^\circ 46' 12''$	0,152	4,83	
9	1,967	4 365	10,13	2,43	$20^\circ 48' 16''$	0,154	4,89	
11	2,99	5 488	10,25	2,40	$20^\circ 46' 12''$	0,152	4,83	
8	1,0264	3 173	9,82	1,60	$20^\circ 18' 48''$	0,1269	4,04	50
10	1,603	3 967	8,825	1,60	$20^\circ 18' 43''$	0,1268	4,04	
12	2,3595	4 767	9,60	1,64	$20^\circ 21' 55''$	0,1298	4,13	
13	2,794	5 174	9,545	1,65	$20^\circ 22' 47''$	0,130	4,15	
8	0,7085	2 632	9,88	1,107	$10^\circ 55' 2''$	0,105	3,34	60
10	1,106	3 293	9,89	1,106	$10^\circ 54' 56''$	0,105	3,34	
12	1,5935	3 953	9,89	1,106	$10^\circ 54' 56''$	0,105	3,34	
II. Condensateurs à huile I et II en série.								
7	5,060	13 585	37,52	10,32	$30^\circ 0' 18''$	0,165	5,24	40
8	6,883	15 410	36,02	10,75	$30^\circ 7' 37''$	0,172	5,46	
9	8,883	17 160	35,52	10,9	$30^\circ 11' 16''$	0,175	5,56	
7	3,397	11 290	35,75	6,93	$20^\circ 31' 10''$	0,138	4,39	50
8	4,432	12 780	35,79	6,925	$20^\circ 31' 3''$	0,1381	4,39	
9	6,864	14 490	34,23	7,24	$20^\circ 37' 55''$	0,144	4,59	
6	1,67	7 945	37,1	4,64	$20^\circ 1' 32''$	0,111	3,54	60
8	3,029	10 608	36,39	4,73	$20^\circ 3' 53''$	0,113	3,60	
9	3,925	11 955	35,56	4,84	$20^\circ 6' 46''$	0,116	3,68	

Pour deux capacités en parallèle, ϱ se calcule d'après la formule de deux résistances en parallèle, que les mesures vérifient également. On peut faire les mêmes observations concernant la résistance r supposée en parallèle.

Tableau V.

I_2 A	W	U Volts	r Ω	ϱ Ω	δ $\text{tg } \delta = \varrho \omega C$	ϑ $(\pi \cdot \text{tg } \delta)$	Pertes %	N
I. Condensateur Junot.								
$6 \cdot 10^{-3}$	0,49	6 470	$92,82 \cdot 10^6$	$1,361 \cdot 10^4$	$00^\circ 41' 38''$	0,038	1,21	40
8	0,880	8 665	91,88	1,375	$00^\circ 42' 3''$	0,0384		
10	1,4667	10 745	86,14	1,467	$00^\circ 44' 52''$	0,041		
12	2,467	12 880	73,75	1,713	$00^\circ 52' 23''$	0,0479	1,52	
9	0,804	7 960	81,42	0,993	$00^\circ 37' 57''$	0,0347	1,10	50
10	1,0014	8 843	80,73	1,00	$00^\circ 38' 15''$	0,0349		
11	1,2467	9 745	78,5	1,03	$00^\circ 39' 22''$	0,036		
12	1,5465	10 670	75,28	1,074	$00^\circ 41' 2''$	0,0375	1,20	
9	0,5962	6 540	76,29	0,736	$00^\circ 33' 46''$	0,0308		60
10	0,7182	7 260	78,2	0,718	$00^\circ 32' 58''$	0,0301	0,96	
11	0,885	8 050	76,81	0,731	$00^\circ 33' 37''$	0,0307		
12	1,070	8 745	75,57	0,743	$00^\circ 34' 5''$	0,0311	0,99	

La valeur de ϱ résultant de l'ensemble formé par une capacité et une résistance ohmique additionnelle, en série ou en parallèle, permet de vérifier l'exactitude des

mesures et la valeur de la méthode. Ainsi, nous avons ajouté en série au condensateur Junot, une résistance ohmique sans self $\varrho' = 10\,000\ \Omega$. L'expérience a donné $\varrho = 20\,900\ \Omega$. Or, $\varrho' + \varrho'' = 20\,300\ \Omega$.

Tableau VI.

I_2 A	W	U Volts	r Ω	ϱ Ω	δ $\text{tg } \delta = \varrho \omega C$	θ $(\pi \cdot \text{tg } \delta)$	Pertes %	N
Condensateur Wien I. $C = 1,8 \cdot 10^{-9}\ F$.								
$6 \cdot 10^{-3}$	0,5865	13 000	$299,7 \cdot 10^6$	$1,63 \cdot 10^4$	$0^\circ 25' 21''$	0,0232	0,74	40
7	0,929	14 755	258,0	1,895	$0^\circ 29' 28''$	0,0269		
6	0,3087	10 790	365,0	0,857	$0^\circ 16' 40''$	0,0152	0,48	50
7	0,442	12 565	347,0	0,902	$0^\circ 17' 32''$	0,0160		
8	0,620	14 265	323,0	0,968	$0^\circ 18' 49''$	0,0172		
6	0,1798	8 745	434,4	0,5	$0^\circ 11' 40''$	0,01066	0,34	60
8	0,323	11 770	430	0,505	$0^\circ 11' 47''$	0,01077		
9	0,4303	13 350	409	0,531	$0^\circ 12' 23''$	0,0113		

Le tableau VII montre l'augmentation des pertes avec la tension. Il suffit de dire qu'elle est petite pour les condensateurs Moscicki et Wien, tandis qu'elle est, à partir d'une tension limite, relativement rapide pour les condensateurs à huile,

Augmentation des pertes de quelques condensateurs avec l'intensité du courant et la tension aux bornes.

Tableau VII.

I_2 A	U Volts	ϱ Ω	δ	Pertes %
I. Condensateur Moscicki II. $C = 3,265 \cdot 10^{-9}\ F$; $\omega = 314$.				
$10 \cdot 10^{-4}$	9 660	14 600	$0^\circ 51' 27''$	1,5
12	11 550	14 500	$0^\circ 51' 6''$	1,5
14	13 200	14 510	$0^\circ 51' 10''$	1,5
16	15 110	14 990	$0^\circ 52' 51''$	1,54
18	17 000	15 600	$0^\circ 55' 0''$	1,6
20	18 800	16 490	$0^\circ 58' 8''$	1,69
II. Condensateur Dubilier .				
8	6 720	7 800	$0^\circ 30' 14''$	0,88
10	8 430	8 420	$0^\circ 32' 39''$	0,95
12	10 120	9 340	$0^\circ 36' 13''$	1,05
14	11 730	10 670	$0^\circ 41' 22''$	1,2
16	13 450	12 480	$0^\circ 48' 23''$	1,4
18	15 110	14 440	$0^\circ 55' 59''$	1,63
III. Condensateur Junot .				
8	7 110	10 000	$0^\circ 38' 12''$	1,11
10	8 843	9 930	$0^\circ 37' 57''$	1,1
12	10 670	10 740	$0^\circ 41' 3''$	1,2
14	12 740	11 480	$0^\circ 43' 54''$	1,28
16	13 840	13 040	$0^\circ 49' 51''$	1,45
18	15 510	16 070	$1^\circ 1' 26''$	1,78

Junot et Dubilier. Ainsi, les pertes des condensateurs à huile sont assez constantes jusqu'à une tension d'environ 8000 volts (tableau IV). La tension limite est, pour

le condensateur Dubilier, environ 10000 volts, pour le condensateur Junot, 12000 volts (tableau VII). La comparaison des pertes ne peut avoir de signification précise qu'à tensions égales.

Pour étudier la variation avec la fréquence, des pertes des condensateurs utilisés, nous avons fait successivement des mesures avec un courant à 40, 50 et 60 périodes. Pour tous les condensateurs en question, nous avons constaté une diminution des pertes avec l'augmentation de la fréquence. Cette diminution, relativement importante pour les condensateurs à huile, est moins forte pour les condensateurs Wien et Dubilier. D'ailleurs, comme on le verra plus loin, le condensateur à huile présente, à haute fréquence, des pertes, exprimées au moyen du décrement logarithmique, qui sont de même ordre que les pertes d'un condensateur à air. Les pertes du condensateur Junot semblent moins dépendre de la fréquence, ce qui correspond aux résultats trouvés à haute fréquence.

Voici, pour quelques condensateurs, les variations de ϑ entre 40 et 60 périodes:

1 ^o	Condensateur à huile	II:	$\vartheta_{40} - \vartheta_{60} = 0,055;$
2 ^o	"	"	I: $\vartheta_{40} - \vartheta_{60} = 0,036;$
3 ^o	"	Wien:	$\vartheta_{40} - \vartheta_{60} = 0,018;$
4 ^o	"	Junot:	$\vartheta_{40} - \vartheta_{60} = 0,007.$

Résumé.

Les pertes trouvées par la méthode de résonance correspondent pour des valeurs I_2 petites avec les pertes trouvées par la méthode directe. Mais pour des valeurs de I_2 croissantes, on remarque une différence appréciable entre les résultats. Elle doit être attribuée à des erreurs dans la détermination des pertes de la bobine ou du transformateur. En effet, les pertes dans le fer et de dispersion doivent subir une correction en fonction de I_1 , suivant la charge. Cette correction de quelques % peut être effectuée en déterminant les chutes de tension dues au fonctionnement du transformateur à circuit fermé.

La méthode du wattmètre est d'autant meilleure que les pertes à déterminer seront grandes. Cependant dans nos conditions, la déviation pour les pertes les plus petites était suffisante (au moins 6 cm) et les lectures faciles. L'application de la méthode est limitée par la sensibilité du wattmètre, tandis que la méthode du transformateur est d'un emploi technique assez simple.

Note sur l'étude des pertes des condensateurs à haute fréquence.

Il était intéressant de procéder, sur les condensateurs qui ont servi à cette étude à la détermination des pertes à haute fréquence, pour établir quelques comparaisons,

La méthode de mesure s'inspire de l'étude publiée par M. H. Pauli²⁰⁾; elle fera l'objet d'une publication spéciale. Le principe peut se résumer ainsi: on applique aux oscillations entretenues, fournies par une machine, le calcul de la répartition de l'énergie entre deux circuits inductifs en parallèle. Le premier circuit est par exemple dépourvu de résistance et de capacité, le second contient le condensateur dont on doit mesurer les pertes. On établit facilement une relation entre le rapport de l'intensité totale du courant à l'intensité dans l'un des circuits dérivés et la résistance ou les pertes.

La source d'énergie à haute fréquence était constituée par un alternateur à fer tournant denté²¹⁾ entraîné par un moteur à courant continu, dont la vitesse peut varier de 1200 à 3000 tours par minute. Le nombre de dents étant de 200, la fréquence du courant peut s'établir de 4000 à 10000.

²⁰⁾ H. Pauli: Z. f. Phys., V, 376, 1921.

²¹⁾ Construit par la Cie. de l'Industrie électrique à Genève et décrit par C.E. Guye: Eclair. électr., T. IX, p. 157, 1896.

A la fréquence de 8600, nous avons trouvé que les pertes des condensateurs à air et à huile étaient négligeables, les mesures fournissant une valeur du même ordre de grandeur que les erreurs d'expériences. Les autres condensateurs donnaient, en exprimant, comme plus haut, les pertes en % :

Wien 0,128 %, Dubilier 0,196 %, Moscicki 0,465 %, Junot 0,594 %.

Pour rapprocher ces résultats de ceux obtenus avec la méthode du wattmètre, à basse fréquence, il faut tout d'abord remarquer que la tension à laquelle étaient soumis les condensateurs, à la haute fréquence, était au maximum d'environ 1000 volts et en général, de beaucoup inférieure à la tension employée avec la méthode directe. Il serait donc difficile de dire, si la diminution des pertes constatée, a lieu uniquement à cause de l'élévation de la fréquence, ou bien uniquement à cause de la réduction de la tension, ou si les deux facteurs y contribuent. Nous croyons pouvoir dire que c'est uniquement l'élévation de la fréquence qui a pour effet de diminuer les pertes. Cette diminution est la plus forte pour le condensateur à huile de sorte qu'à haute fréquence, il a pu être considéré comme sans pertes.

En effet, pour le condensateur à huile, le décrétement trouvé par la méthode directe, est constant pour des tensions croissantes de 2000 à 8000 volts (tableaux III et IV); nous pouvons sans crainte supposer qu'il l'est encore pour une tension de 1000 volts, qui est de l'ordre de celle employée à haute fréquence. De là, la conclusion que la diminution des pertes du condensateur à huile est due uniquement à l'élévation de la fréquence.

Cela est *a fortiori* encore plus vrai au sujet des condensateurs construits pour la haute tension: Moscicki, Wien, Junot et Dubilier. M. Wien²²⁾ a d'ailleurs, démontré que les pertes du condensateur à acide carbonique (condensateur Wien) étaient indépendantes de la tension jusqu'à rupture diélectrique.

Le tableau VII nous montre que les pertes du condensateur Moscicki sont constantes jusqu'à 13000 volts, de même, celles du condensateur Junot, jusqu'à 10000 volts, celles du condensateur Dubilier, jusqu'à 8000 volts. Nous en tirons la conclusion que les pertes des condensateurs employés sont indépendantes de la tension, jusqu'à une certaine tension qui est différente pour chaque condensateur et à partir de laquelle les pertes augmentent, plus ou moins vite, suivant le modèle.

La variation des pertes avec la fréquence dépend du diélectrique. La diminution des pertes du condensateur à huile, avec la fréquence, est très grande, celles du condensateur Dubilier sont, à haute fréquence, trois fois plus petites que celles du condensateur Junot tandis qu'à basse fréquence, elles sont, à peu de chose près, égales. La diminution des pertes avec la fréquence est plus forte pour le condensateur Wien que pour le condensateur Moscicki. De plus, il résulte de nos observations qu'un condensateur à air (Boas) ne peut être considéré comme absolument sans pertes, qu'à une tension inférieure à 400 volts, probablement en raison de l'ionisation par choc.

Institut de Physique de l'Université de Fribourg.

²²⁾ M. Wien: Ann. d. Phys., 29, 689, 1909.

CURRICULUM VITÆ.

Jean-Baptiste Berther, fils de Louis, de Disentis (Grisons), et de son épouse Thérèse, née Monn; je suis né à Disentis, Disla, le 19 mai 1898.

Je fis mes classes primaires à Disla, mes études secondaires au Collège des Bénédictins de Disentis et au Collège Maria-Hilf à Schwyz où j'obtins, en 1918, le diplôme de maturité.

En octobre de cette même année, je fus immatriculé à l'Université de Fribourg, Faculté des Sciences, où je suivis les cours de MM. les Professeurs Baumhauer, Bistrzycki, v. Estreichner, Girard, Gockel, Joye, Plancherel, et fréquentai les laboratoires de MM. les Professeurs v. Estreichner et Joye.

Au mois de Janvier 1921, je fus nommé, par le Haut Conseil d'Etat, assistant à l'Institut de Physique de l'Université. En été 1921, je subis les examens de licence en sciences naturelles; puis, sous la direction de M. le Professeur Joye, je commençai un travail qui devient par la suite cette thèse de doctorat.

Je saisis ici l'occasion de remplir un devoir de reconnaissance en remerciant tous mes maîtres de l'intérêt qu'ils ont porté à mes études. Je prie tout spécialement M. le Professeur Joye, dont je fus l'assistant durant quatre ans, d'accepter l'expression de ma gratitude profonde pour la bienveillance qu'il n'a cessé de me témoigner et le soin avec lequel il m'a dirigé dans mes études et mes travaux.

